بررسی رفتار اتساع و مقاومت برشی مخلوط‌های شن و ماسه در مقادیر شن دانه بالاتر از آستانه شناوری

مجتبی‌علی‌زاده، امیر حمیدی:
دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت معلم تهران
alizadeh@tmu.ac.ir, hamidi@tmu.ac.ir

تاریخ: دریافت ۸۷/۹/۲۵ پذیرش ۸۸/۷/۲۷

چکیده

شرایط شناوری در خاک مخلوط شن و ماسه‌ای، به حالتی اطلاق می‌شود که شن دانه‌ها درصد اندکی از مخلوط را تشکیل داده، در بخش ماتریس ماسه شناور بوده و تماس اندکی بین آن‌ها برقرار است. در این حالت، مقاومت و خصوصیات تغییر شکل خاک تحت تأثیر بخش ریزتر یعنی ماسه خواهد بود. با افزایش مقدار شن تماس بین ذرات شن‌دانه ایجاد شده و ماسه فقط فضای خالی ما بین آن‌ها را پر خواهد نمود. این وضعیت حالت غیرشناوری شن دانه‌ها را نشان می‌دهد. مقاومت و خصوصیات تغییر شکل خاک در این حالت توسط بخش درشت‌تر مخلوط یعنی شن کنترل می‌شود. در تحقیق حاضر برای ارزیابی رفتار مقاومت برشی مخلوط‌های شن و ماسه در شرایط غیرشناوری شن دانه‌ها، از دستگاه آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس با ابعاد جعبه برش ۱۶۰ ×۳۰۰×۳۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. شن با دانه‌بندی یک‌نواخت و حداکثر اندازه ۱۲/۵ میلی‌متر با شکل گردگوشه به عنوان بخش درشت‌تر به کار رفته است. برای قسمت ریزتر نیز از ماسه بد دانه‌بندی شده سواحل بابلسر استفاده شده است. نمونه‌های مخلوط شن و ماسه به‌صورت کاملاً خشک در چهاردرصد وزنی شن متفاوت ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ و در سه تراکم نسبی ۳۵، ۶۰ و ۸۵ درصد آماده و تحت سربارهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال آزمایش شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ازدیاد تراکم نسبی و درصد شن دانه سبب افزایش مقاومت برشی خاک‌های مخلوط شن و ماسه می‌شود. همچنین نرخ تغییرات مقاومت برشی یا زاویه اصطکاک خاک با درصد شن دانه، در مقادیر پایین‌تر از

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.6.9]

حد شناوری که رفتار توسط ماتریس ماسه ای ریزتر کنترل می‌شود شدیدتر از مقادیر نظیر در بالاتر از حد شناوری است که رفتار خاک مخلوط به‌وسیله بخش درشت‌تر شنی کنترل می‌شود.

مقدمه

مقاومت برشی خاک‌های ماسه‌ای حاوی دانه‌های درشت در حد شن، یکی از مسائل مهم در طراحی‌های ژئوتکنیکی است. همچنین رفتار مصالح، تابعی از متغیرهای متعدد است که نمی‌توان از هیچ یک از آن‌ها صرف نظر کرد، بنا بر این انجام آزمایش‌های مکانیکی در شرایطی منطبق بر شرایط سازه اصلی، ضروری به نظر می‌رسد.

حال با توجه به تأثیر اندازهٔ نمونه در تعیین ویژگی‌های رفتاری خاک‌های مخلوط، معمولاً اندازهٔ دانه‌ها به یک هشتم تا یک ششم ابعاد نمونه آزمایش شده، محدود می‌گردد. با توجه به این محدودیت، ارزیابی رفتار تنش-کرنش مخلوط‌های درشت‌دانه با اندازهٔ دانه‌های یک سانتی‌متر یا بیش‌تر، نیاز به دستگاه‌های آزمایشگاهی با ابعاد نمونهٔ بزرگ خواهد داشت که موجب بروز پاره‌ای مشکلات می‌شود.

همچنین در پژوهش‌های قبلی صورت گرفته در این خصوص، در پاره‌ای موارد نتایج متناقض مشاهده می‌شود. مطابق تحقیقات فراگاتزی و همکاران (۱۹۹۰ و ۱۹۹۲)، مقاومت سه محوری استاتیکی خاک‌های مخلوط شن و ماسه با افزایش مقدار شن در دانسیتهٔ نسبی مخلوط یک‌سان کاهش یافته، در صورتی که طبق پژوهش‌های اونس و ژو(۱۹۹۵) مقاومت سه محوری تناوبی مخلوط با افزایش مقدار درشت‌دانه افزایش می‌یابد. محققان بسیاری مانند یاگیز(۲۰۰۱)، کوکوشو و همکاران(۲۰۰۴) و سیمونی و هولزبای (۲۰۰۶) نتیجه گرفتند که مقاومت برشی مخلوط با ازدیاد میزان شن افزایش می‌یابد.

والخو (۲۰۰۱) نشان داد که مقاومت برشی مخلوط شن و ماسه، زمانی‌که میزان شن بیش از ۷۰ درصد است با مقاومت اصطکاکی دانه‌های شن کنترل می‌شود.

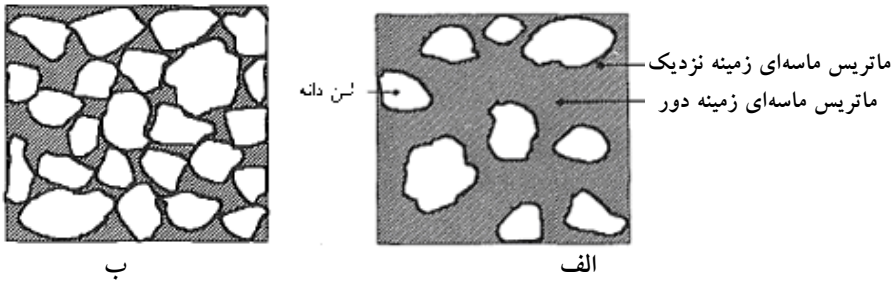
فراگاتزی و همکاران (۱۹۹۰ و۱۹۹۲)، تعاریف شناوری و غیرشناوری شن دانه‌ها در مخلوط شن و ماسه را ارائه دادند. طبق تعریف ایشان حالت شناوری در نمونه خاک ماسه‌ای حاوی شن، به شرایطی اطلاق می‌شود که شن دانه‌ها درصد اندکی از مخلوط را تشکیل داده،

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.6.9]

در بخش ماتریس ماسه شناور بوده و تماس اندکی بین آن‌ها برقرار است (شکل۱. الف). در این حالت، مقاومت و خصوصیات تغییر شکل خاک تحت تأثیر بخش ریزترخواهد بود. دلیل این موضوع، به تماس اندک و ناچیز ذرات درشت‌تر نسبت داده می‌شود. این حد که به‌عنوان آستانه شناوری تعریف می‌شود طبق پژوهش‌های محققان گذشته ممکن است تا درصد شن ۶۰ حتی گاهاً حدود ۷۰ نیز برسد. علت اختلاف بین این حدود در آزمایش‌های مختلف وابسته به تفاوت در نسبت تخلخل و نوع قیدهای بین دانه‌ای که مابین دانه‌های درشت و ریز ایجاد می‌شود و یا ضریب یک‌نواختی مخلوط است. اما به نظر می‌رسد که مهم‌ترین عامل فیزیکی مؤثر بر آستانه شناوری مخلوط‌های شن و ماسه‌ای، دانه‌بندی مصالح به‌کار رفته و درصد هر کدام در مخلوط مورد نظر باشد.

با افزایش مقدار شن فراتر از میزان حدشناوری، تماس بین ذرات شن‌دانه ایجاد شده و ماتریس ماسه فقط فضای خالی بین درشت دانه‌ها را پر خواهد نمود که حالت غیرشناوری را ایجاد می‌نماید (شکل۱. ب). مقاومت و خصوصیات تغییر شکل خاک در این حالت با قسمت درشت‌تر مخلوط کنترل می‌شود.



شکل۱. وضعیت خاک مخلوط شن وماسه‌ای درحالات
الف) شناوری شن دانه‌ها ب)غیرشناوری شن دانه‌ها
(فراگاتزی و همکاران، ۱۹۹۲)

حمیدی و همکاران (a-۲۰۰۹)، رفتار خاک مخلوط شن و ماسه‌ای را در شرایط شناوری شن‌دانه‌ها بررسی کردند. در تحقیق ایشان مخلوط ماسه با درصدهای شن‌دانه ۲۰، ۴۰ و ۶۰ مورد آزمایش قرار گرفت و تأثیرات سربار، تراکم نسبی و درصد شن بر رفتار خاک مخلوط ارزیابی گردید. بر اساس این تحقیق مشخص شد که مقاومت مخلوط با افزایش درصد شن‌دانه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.6.9]

ازدیاد می‌یابد، اگرچه رفتار در پایین‌تر از حد شناوری عمدتاً توسط بخش ریزتر ماسه‌ای کنترل می‌شود، اما وجود شن‌دانه‌ها بر ویژگی‌های مقاومتی و تغییرشکل خاک تأثیر به‌سزایی می‌گذارند.

مقاومت برشی خاک‌های مخلوط حاوی شن دانه در تحقیقات چند دهۀ اخیر حائز اهمیت فراوان شده و بحث و بررسی‌های بسیاری در این مورد انجام شده است. همچنین مدل‌های ریاضی متعددی نیز برای تخمین مقاومت مخلوط شن و ماسه با حذف بخش درشت‌دانه پیشنهاد شده است. یکی از این موارد، تحقیقات حمیدی و همکاران (b–۲۰۰۹) بوده است. در این تحقیق روابطی برای پیش‌بینی مقاومت برشی مخلوط ماسه و شن بر مبنای مقاومت بخش ریزتر ماسه‌ای ارائه شده است. ایشان روابط تجربی را با تمرکز بر زوایای اصطکاک داخلی حداکثر و حالت بحرانی و بررسی اثر سربار و تراکم نسبی مخلوط ارائه کرده‌اند. بر مبنای این روابط مشخصه‌های مقاومتی مخلوط شن و ماسه را می‌توان با انجام آزمایش فقط روی ماتریس ریزتر به‌دست آورد که به دلیل محدودیت‌های موجود در آزمایش‌های بزرگ مقیاس حائز اهمیت است. اثرات سربار و خردشدگی دانه‌ها ناشی از آن نیز در این روابط گنجانده شده است.

در تحقیق حاضر، حالت غیرشناوری شن دانه‌ها به منظور بررسی تأثیر درصد شن، میزان تراکم و اثر سربار بر رفتار برشی خاک‌های مخلوط شن و ماسه بررسی می‌شود. شایان ذکر است که نگارندگان تاکنون تحقیقی که رفتار خاک در حالت غیرشناوری شن دانه‌ها را بررسی کند، مشاهده نکرده‌اند.

مصالح مورد آزمایش در این تحقیق

مصالح استفاده شده در این تحقیق شامل شن و ماسه است. ماسۀ مورد نیاز از سواحل بابلسر جمع‌آوری شده و دارای ضریب یک‌نواختی۱/۷۵ و ضریب خمیدگی ۰/۸۹ است (شکل۲. الف). مصالح شن، شامل شن گردگوشه با دانه‌بندی یک‌نواخت است. برای تهیۀ شن در اندازۀ ۱۲/۵ میلی‌متر، مصالح الک شده و دانه‌های شن عبوری از الک ۱۲/۵ و مانده روی الک ۹/۲۵ میلی‌متر جمع‌آوری شده است (شکل ۲. ب).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.6.9]

حمیدی و همکاران (a-۲۰۰۹) با انجام آزمایش برای مصالح تحقیق حاضر با استفاده از پیکنومتر استاندارد بالنی شکل، مقدار چگالی ویژه (Gs) دانه‌های ماسه و شن را به ترتیب برابر ۲/۷۴ و ۲/۶۴ گزارش کردند

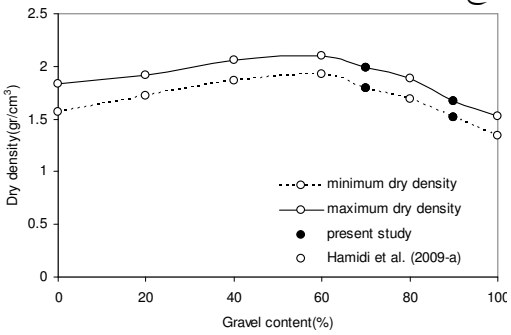
شکل۲. مصالح استفاده شده در این تحقیق

الف) ماسه **ب)شن**

آزمایش‌های انجام شده

۱. تعیین نسبت تخلخل حداقل و حداکثر مخلوط

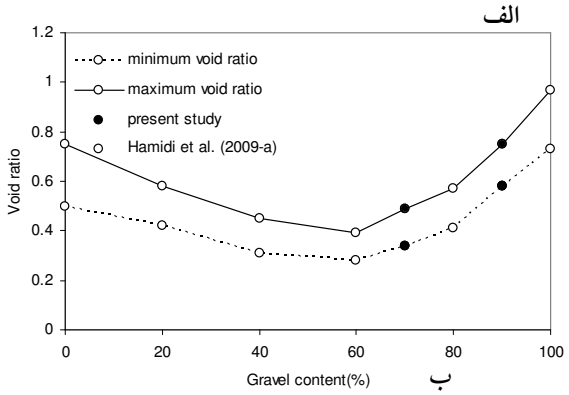
تعیین نسبت تخلخل حداقل و حداکثر مخلوط به ترتیب مطابق استانداردهای ASTM D-4253 و ASTM D-4254 انجام شده است. نسبت تخلخل حداقل و حداکثر به‌عنوان حالت‌های حدی تراکم شناخته می‌شوند. نمودار تغییرات نسبت تخلخل‌های حدی مخلوط و همچنین چگالی حداقل و حداکثر در مقابل درصد شن در شکل ۳ نشان داده شده است. برای بررسی دقیق‌تر نتایج، مقادیر به‌دست آمده در جدول۱ ارائه شده است. همان‌گونه که از شکل (۳. ب) مشخص است درصد شن حدود ۶۰ را می‌توان به عنوان آستانه شناوری برای مصالح حاضر در نظر گرفت. خاطر نشان می‌شود که در این تحقیق فقط آزمایش‌های تعیین نسبت تخلخل حداقل و حداکثر مخلوط‌های حاوی شن ۷۰ و ۹۰ درصد، انجام شده و سایر داده‌ها از تحقیق حمیدی و همکاران (a-۲۰۰۹) استخراج شده است.



شکل۳. نمودار الف) نسبت تخلخل‌های حدی مخلوط

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.6.9]



ب)چگالی‌های حدی مخلوط در مقابل درصد شن

جدول ۱. نسبت تخلخل و چگالی حداقل و حداکثر برای مخلوط با درصدهای شن مختلف

Gravel content %	e_{min}	e_{max}	ρ_{min}	ρ_{max}
۰	۰/۵۰	۰/۷۵	۱/۵۷	۱/۸۳
۲۰	۰/۴۲	۰/۵۸	۱/۷۱	۱/۹۱
۴۰	۰/۳۴	۰/۴۵	۱/۸۶	۲/۰۱
۶۰	۰/۲۷	۰/۳۹	۱/۹۳	۲/۱۱
*۷۰	۰/۳۴	۰/۴۹	۱/۷۹	۱/۹۹
۸۰	۰/۴۱	۰/۵۷	۱/۶۹	۱/۸۸
*۹۰	۰/۵۸	۰/۷۵	۱/۵۱	۱/۶۷
۱۰۰	۰/۷۳	۰/۹۵	۱/۳۴	۱/۵۳

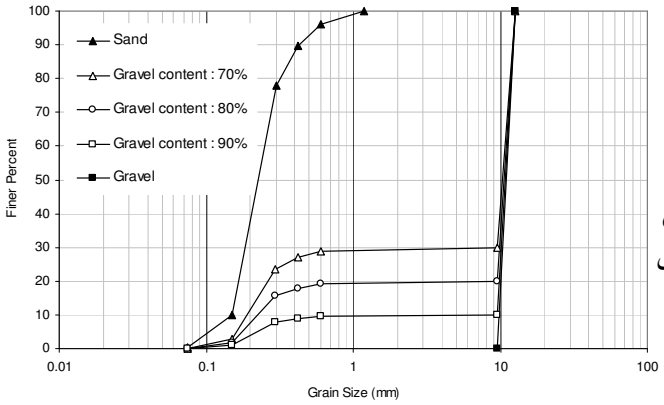
*** به جز داده‌های مربوط به درصد شن‌های ۷۰ و ۹۰، مابقی از تحقیق حمیدی و همکاران (a-۲۰۰۹) استخراج شده است.**

۲. آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس

در این تحقیق به‌منظور بررسی رفتار مقاومتی و تغییر شکلی خاک تحت بارگذاری استاتیکی در شرایط غیرشناوری شن‌دانه‌ها، از آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ مقیاس با ابعاد جعبه برش ۱۶۰×۳۰۰×۳۰۰ میلی‌متر بر نمونه‌های بازسازی شده در تراکم‌های نسبی ۳۵، ۶۰ و ۸۵ درصد تحت فشارهای سربار ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال استفاده شده است. نمودار دانه‌بندی ماسه، شن و مخلوط حاوی درصدهای مختلف شن دانه در شکل ۴ نشان داده شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.6.9]



شکل۴. منحنی دانه‌بندی ماسه، شن و مخلوط‌های ماسه و شن

برای آماده‌سازی نمونه، ابتدا وزن مخلوط شن و ماسهٔ مورد نیاز برای قالب به ابعاد ۱۶۰×۳۰۰×۳۰۰ میلی‌متر، محاسبه شده است. بدین منظور با توجه به انجام آزمایش‌ها در شرایط خشک، از وزن واحد حجم خشک نمونه‌ها بسته به میزان تراکم نسبی مورد نظر استفاده شده است. با توجه به ساخت نمونه در سه لایه، وزن به‌دست آمده فوق که وزن کل نمونه است به سه قسمت تقسیم می‌شود. در این صورت، وزن شن و ماسهٔ لازم برای هر لایه بر حسب درصد وزنی شن و ماسه مورد نظر در مخلوط به‌دست می‌آید. پس از ریختن و متراکم کردن هر سه لایه درون قالب، با گذاشتن وزنه‌های نظیر سربار مورد نظر، آزمایش‌ها آغاز شده است. ضمن آن‌که هر آزمایشی با سرعت بارگذاری ۰/۴ میلی‌متر در دقیقه و درشرایط کاملاً زه‌کشی شده انجام شده است. همچنین به‌دلیل برخی محدودیت‌های موجود در آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس، آزمایش تا کرنش‌های برشی حدود ۱۲ درصد ادامه یافته است.

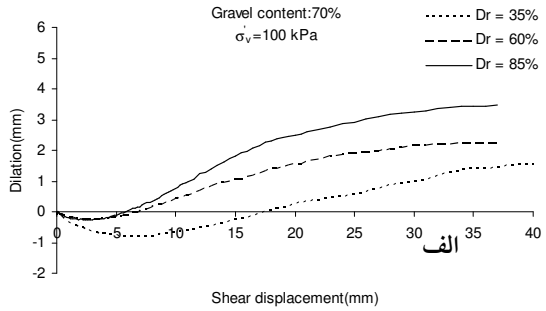
بررسی عوامل مؤثر بر مقاومت برشی مخلوط شن و ماسه

۱. مقاومت مخلوط در تراکم‌های نسبی متفاوت

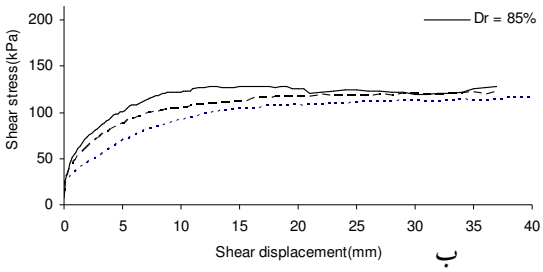
نمودار تنش برشی- جابه‌جایی افقی و جابه‌جایی قائم (اتساع)- جابه‌جایی افقی نمونه‌های مخلوط حاوی مقادیر شن ۷۰ و ۸۰ درصد در تراکم‌های نسبی ۳۵، ۶۰ و ۸۵ و در سه سربار ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال در شکل‌های (۵) تا (۱۰) ارائه شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.6.9]

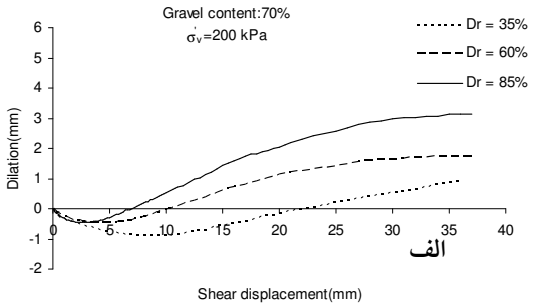


شکل۵. نمودار الف) تنش برشی در مقابل جابه‌جایی افقی،

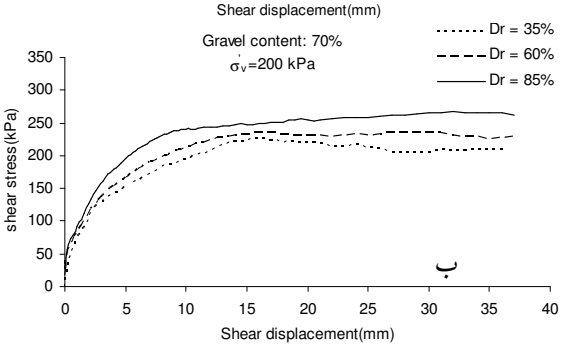


ب) جابه‌جایی قائم در مقابل جابه‌جایی افقی

برای نمونه‌های با ۷۰ درصد شن تحت سربار۱۰۰ کیلو پاسکال در تراکم‌های نسبی مختلف



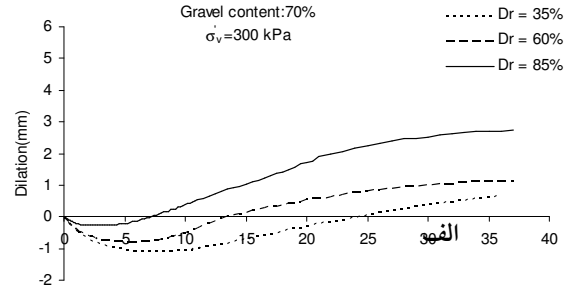
شکل ۶.
نمودار الف) تنش برشی در مقابل جابه‌جایی افقی،



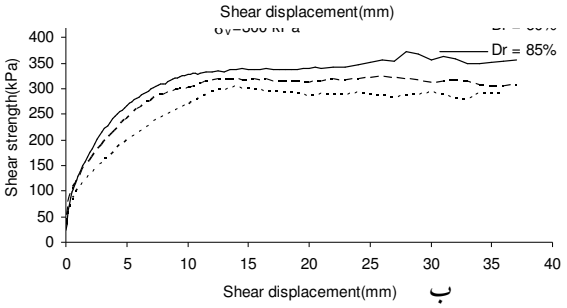
ب) جابه‌جایی قائم در مقابل جابه‌جایی افقی

برای نمونه‌های با ۷۰ درصد شن تحت سربار۲۰۰ کیلو پاسکال در تراکم‌های نسبی مختلف

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.6.9]

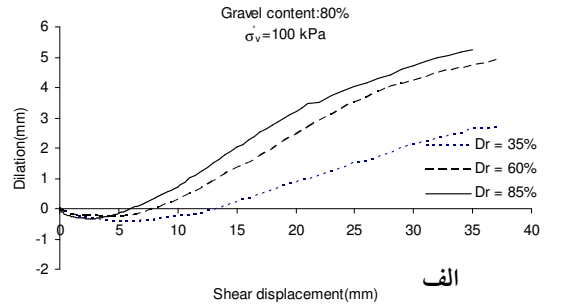


شکل ۷.
نمودار الف) تنش برشی در مقابل جابه‌جایی افقی،

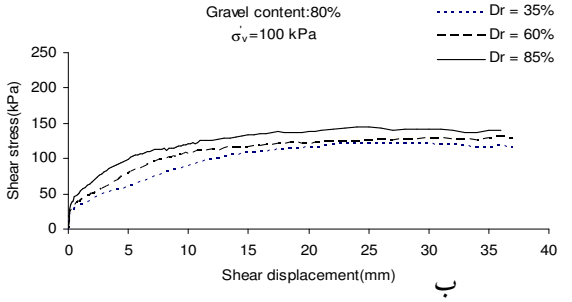


ب) جابه‌جایی قائم در مقابل جابه‌جایی افقی

برای نمونه‌های با ۷۰ درصد شن تحت سربار ۳۰۰ کیلو پاسکال در تراکم‌های نسبی مختلف



شکل ۸.
نمودار الف) تنش برشی در مقابل جابه‌جایی افقی،

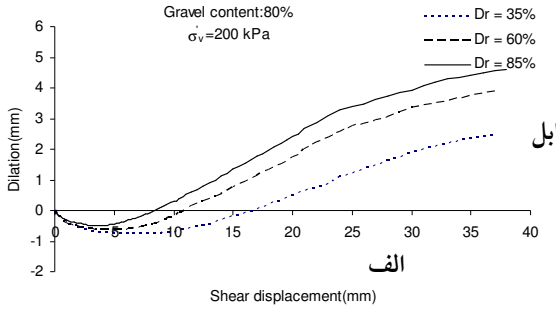


ب) جابه‌جایی قائم در مقابل جابه‌جایی افقی

برای نمونه‌های با ۸۰ درصد شن تحت سربار ۱۰۰ کیلو پاسکال در تراکم‌های نسبی مختلف

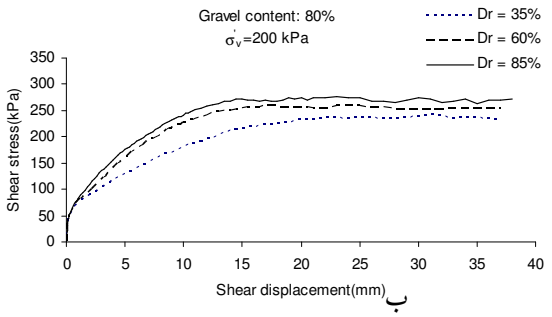
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.6.9]



شکل ۹.
نمودار الف) تنش برشی در مقابل جابه‌جایی افقی،

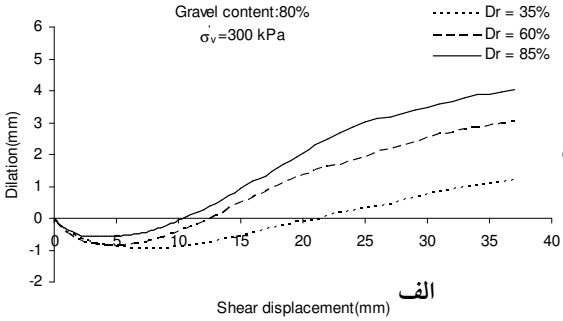
الف



ب) جابه‌جایی قائم در مقابل جابه‌جایی افقی

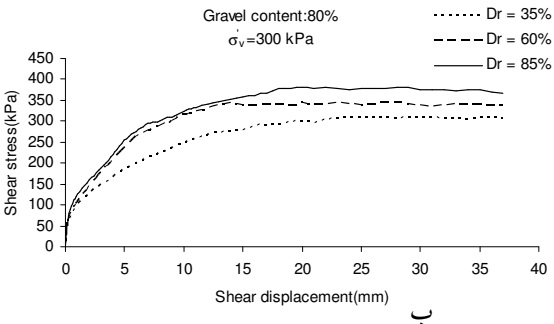
ب

برای نمونه‌های با ۸۰ درصد شن تحت سربار ۲۰۰ کیلو پاسکال در تراکم‌های نسبی مختلف



شکل ۱۰.
نمودار الف) تنش برشی در مقابل جابه‌جایی افقی،

الف



شکل ۱۰.
ب) جابه‌جایی قائم در مقابل جابه‌جایی افقی

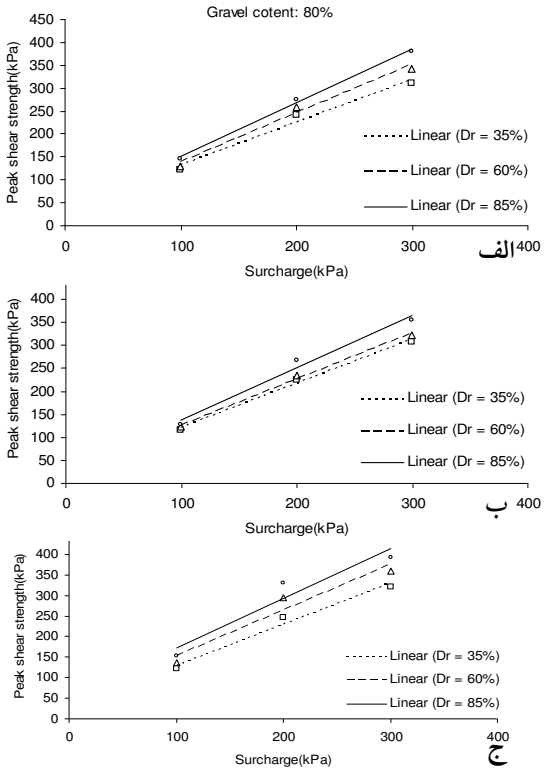
ب

برای نمونه‌های با ۸۰ درصد شن تحت سربار ۳۰۰ کیلو پاسکال در تراکم‌های نسبی مختلف

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.6.9]

با توجه به نمودارهای فوق، مشخص می‌شود که با افزایش تراکم نسبی بر مقاومت مخلوط افزوده می‌شود. در واقع با ازدیاد تراکم نسبی مخلوط، درگیری دانه‌ها و قفل و بست بین آن‌ها افزایش یافته و اتساع خاک بیش‌تر می‌شود و در نتیجه مقاومت برشی مخلوط افزایش می‌یابد. از نمودارهای اتساع در مقابل جابه‌جایی افقی واضح است که ابتدا به دلیل فرورفتن دانه‌ها در یک‌دیگر کاهش حجم اولیه را خواهیم داشت اما اعمال نیروی برشی بیش‌ترسبب حرکت و غلتیدن دانه‌ها روی یک‌دیگر و افزایش حجم خواهد شد.

پوش گسیختگی خاک با استفاده از رگرسیون خطی بر داده‌های به‌دست آمده از آزمایش در شکل۱۱، نشان داده شده است. در هر سری از این شکل‌ها و برای درصدهای شن مختلف به‌وضوح مشخص است که با افزایش تراکم نسبی مخلوط، پوش گسیختگی خاک بالاتر رفته و شیب آن که بیان‌گر زاویه اصطکاک خاک است افزایش می‌یابد.



شکل۱۱. پوش گسیختگی خاک در درصدهای شن مختلف

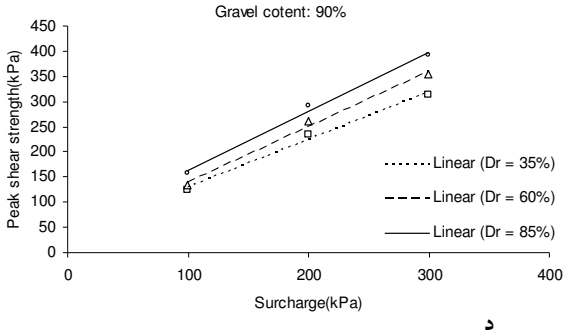
الف) ۷۰ درصد شن

ب)۸۰ درصد شن

ج)۹۰ درصد شن

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

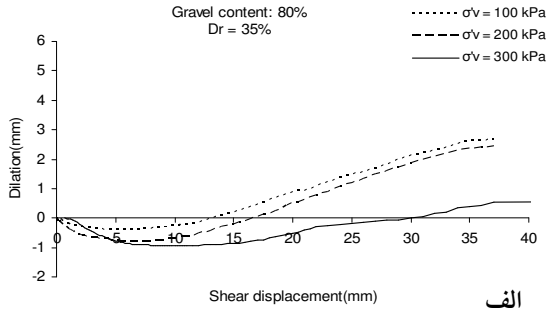
[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.6.9]



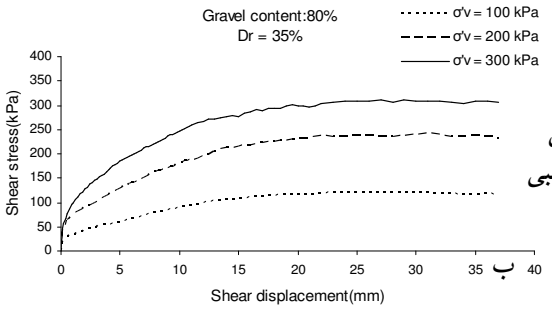
د) ۱۰۰ درصد شن

۲. اثر سربار

تأثیر سربار بر مقاومت برشی و اتساع برای مخلوط حاوی ۸۰ درصد شن دانه در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ ارائه شده است. بر اساس این شکل‌ها، اگرچه افزایش سربار میزان اتساع خاک مخلوط را کاهش می‌دهد، اما در کل موجب ازدیاد کار انجام شده در راستای نرمال می‌گردد و این موضوع سبب افزایش مقاومت برشی خواهد شد. همچنین شکل‌ها نشان می‌دهند که با افزایش سربار روی نمونه، تأثیر فزاینده آن بر مقاومت برشی مخلوط کاهش خواهد داشت. علت اصلی این موضوع را می‌توان به خردشدگی دانه‌ها در سربارهای بالاتر از مقدار ۱۰۰ کیلوپاسکال نسبت داد.



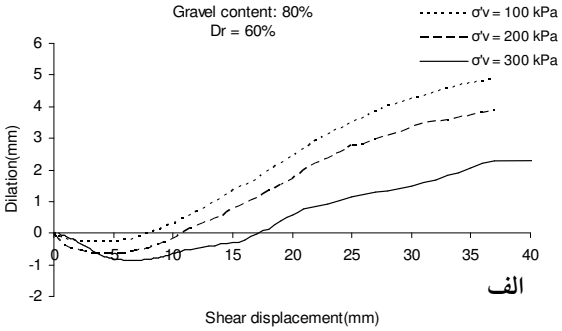
شکل۱۲.
نمودار الف) تنش برشی در مقابل جابه‌جایی افقی،



ب) جابه‌جایی قائم در مقابل جابه‌جایی افقی برای نمونه‌های با ۸۰ درصد شن و تراکم نسبی ۳۵ درصد در سربارهای مختلف

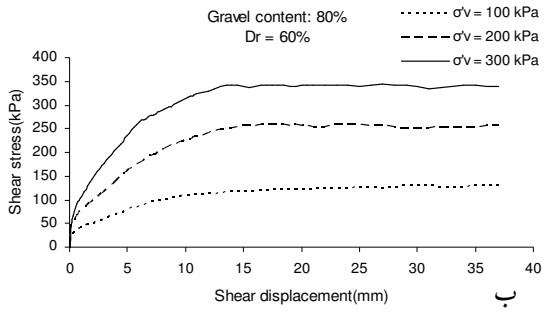
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.6.9]



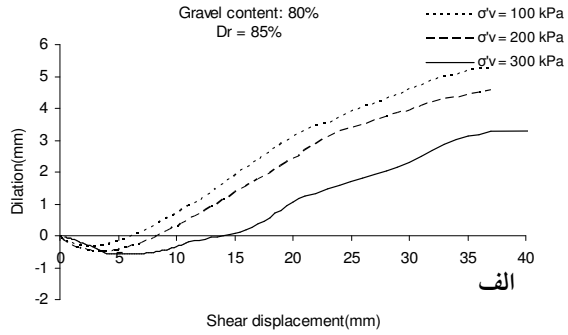
شکل ۱۳.

نمودار الف) تنش برشی در مقابل جابه‌جایی افقی



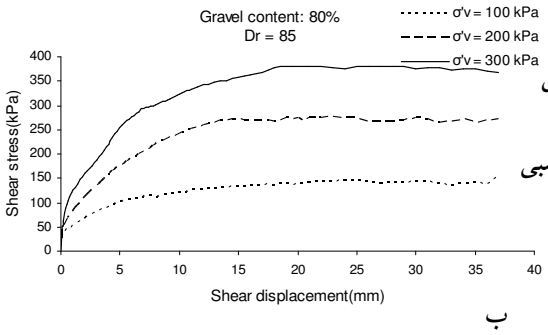
ب) جابه‌جایی قائم در مقابل جابه‌جایی افقی

برای نمونه‌های با ۸۰ درصد شن و تراکم نسبی ۶۰ درصد در سربارهای مختلف



شکل ۱۴.

نمودار الف) تنش برشی در مقابل جابه‌جایی افقی،



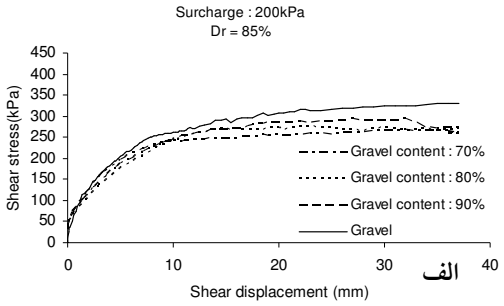
ب) جابه‌جایی قائم در مقابل جابه‌جایی افقی

برای نمونه‌های با ۸۰ درصد شن و تراکم نسبی ۸۵ درصد در سربارهای مختلف

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.6.9]

۳. تأثیر درصد شن بر رفتار برشی مخلوط شن و ماسه

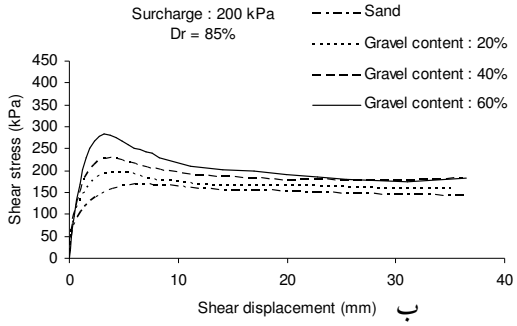
شکل ۱۵ تأثیر درصد شن بر منحنی تنش-کرنش مخلوط شن و ماسه در شرایط شناوری و غیرشناوری شن‌دانه‌ها در تراکم نسبی ۸۵ درصد تحت سربار ۲۰۰ کیلو پاسکال را نشان می‌دهد. بر اساس شکل (۱۵-الف) که از تحقیقات حمیدی و همکاران (a-۲۰۰۹) اقتباس شده است، در مقادیر شن‌دانه پایین‌تر از حد شناوری، افت مقاومت بعد از اوج یا رفتار نرم شونده مشاهده می‌شود. اما بر اساس آزمایش‌های انجام شده در تحقیق حاضر در مقادیر شن‌دانه بالاتر از آستانه شناوری، رفتار مخلوط به‌صورت سخت شونده با کرنش و بدون افت مقاومت خواهد بود (شکل ۱۵-ب). علت این امر آن است که در مقادیر شن دانه پایین‌تر از آستانه شناوری، رفتار مخلوط به‌وسیله بخش ماسه‌ای کنترل می‌شود. بدین ترتیب رفتار مجموعه به درصد شن‌دانه موجود حساس بوده و بنا بر این رفتار نرم شونده مخلوط، با ازدیاد درصد شن نمود بیش‌تری خواهد داشت. اما درمقادیر شن دانه فراتر از استانه شناوری، رفتار مخلوط با بخش شنی کنترل می‌شود. به عبارت دیگر در این شرایط تماس کامل بین شن دانه‌ها برقرار شده است و ماسه موجود در مخلوط تأثیر کم‌تری بر خصوصیات مقاومتی آن خواهد گذاشت. بنا بر این همان طور که مشاهده می‌شود، با توجه به درگیری کامل شن دانه‌ها در یک‌دیگر، افت مقاومت و رفتار نرم شونده در این شرایط مشاهده نمی‌شود و رفتار سخت شونده تا حصول به کرنش‌های بالا بر مخلوط حاکم خواهد بود.



شکل ۱۵. تأثیر درصد شن بر منحنی تنش-کرنش مخلوط شن وماسه در الف) حالت شناوری (حمیدی و همکاران، a-۲۰۰۹)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.6.9]



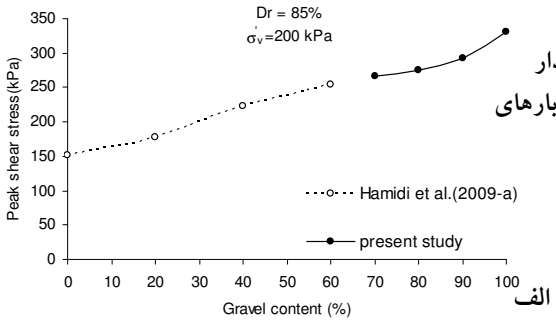
شکل ۱۵. ب) شرایط غیرشناوری

نمودار تغییرات مقاومت برشی در مقابل درصد شن در تراکم نسبی ۸۵ درصد در شکل ۱۶ نشان داده شده است. بر اساس این شکل مشاهده می‌شود که مقاومت مخلوط با افزایش درصد شن در دانسیتهٔ نسبی ثابت افزایش می‌یابد. این امر به‌طور واضح هم در پژوهش‌های حمیدی و همکاران (a–۲۰۰۹) برای شن دانه کم‌تر از حدشناوری و همچنین در تحقیق حاضر برای شن دانه بالاتر از حدشناوری مشخص است. اما نرخ تغییرات مقاومت برشی در درصدهای شن دانه پایین‌تر از آستانهٔ شناوری یعنی حدود ۶۰ درصد، بیش‌تر از مقدار نظیر در درصدهای بالاتر از حد شناوری است. علت این موضوع نیز آن است که در درصدهای بالاتر از آستانه شناوری، رفتار مخلوط کاملاً به‌وسیله فاز درشت‌تر شنی کنترل می‌شود. بدین ترتیب با توجه به درگیری کامل شن دانه‌ها در یک‌دیگر، تغییر در درصد ماسه موجود در مخلوط تأثیر چندانی بر مقاومت برشی نخواهد داشت. اما در مقادیر پایین‌تر از آستانه شناوری که رفتار توسط بخش ماسه‌ای کنترل می‌شود، تغییر در درصد شن موجود در مخلوط تأثیر به‌سزایی بر رفتار و مقاومت برشی خاک خواهد گذاشت.

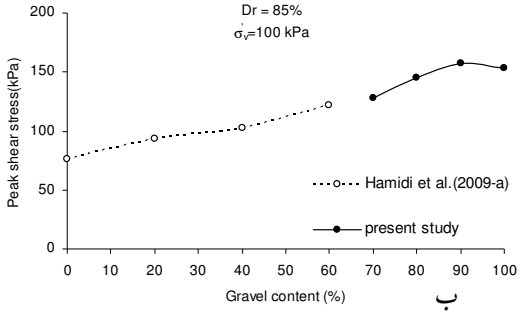
تغییرات زاویه اصطکاک مخلوط در مقابل تراکم نسبی برای مقادیر شن دانه مختلف همراه با مقایسه تحقیق حاضر و تحقیق حمیدی و همکاران (a–۲۰۰۹) در تراکم نسبی ۸۵ درصد در شکل۱۷ نشان داده شده است. از این شکل پیداست که افزایش مقدار شن و تراکم نسبی، سبب ازدیاد مقدار زاویه اصطکاک داخلی در هر دو حالت شناوری و غیرشناوری شده که منجر به افزایش مقاومت برشی می‌شود. البته شکل (۱۷. ب) تأیید می‌کند که نرخ تغییرات زاویه اصطکاک مخلوط در مقادیر شن‌دانه بالاتر از آستانه شناوری به مراتب کم‌تر از مقادیر نظیر در پایین‌تر از حدشناوری است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

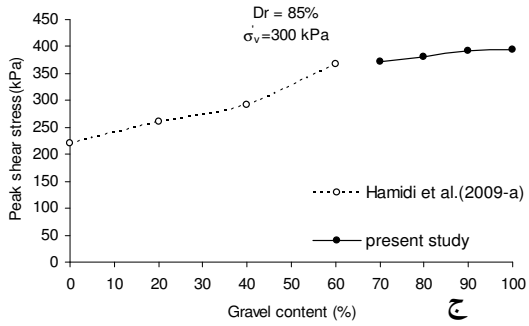
[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.6.9]



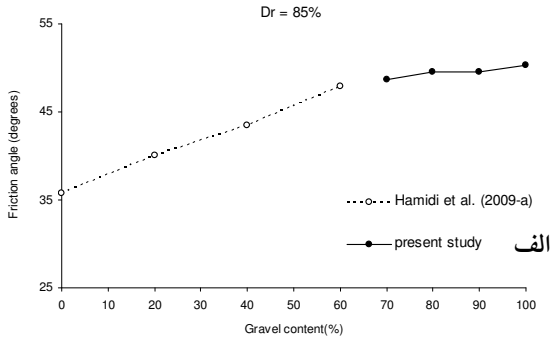
شکل۱۶. تغییرات مقاومت برشی با مقدار شن درتراکم نسبی ۸۵ درصد برای سربارهای الف) ۱۰۰ کیلوپاسکال



ب)۲۰۰ کیلوپاسکال



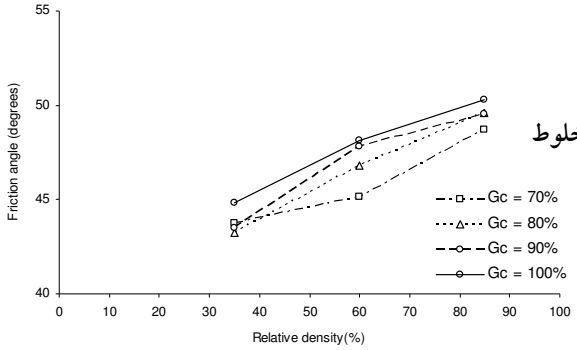
ج) ۳۰۰ کیلوپاسکال



شکل ۱۷. تغییرات زاویه اصطکاک خاک با الف) تراکم نسبی مخلوط

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.6.9]

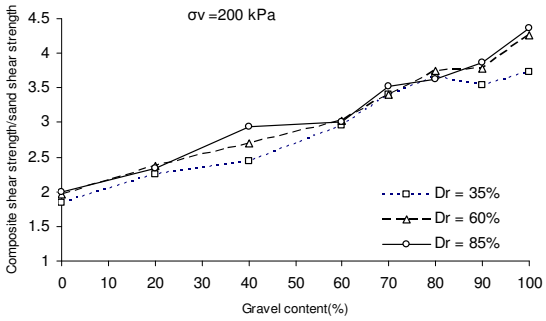


شکل ۱۷. ب) درصد شن دانه مخلوط

ب

تأثیر درصد شن بر نسبت مقاومت مخلوط شن و ماسه به مقاومت ماسه بدون شن در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان داده شده است. در شکل ۱۸ واضح است که با افزایش درصد شن در مخلوط، نسبت مقاومت برشی مخلوط به ماسه افزایش یافته اما تراکم نسبی تأثیر کم‌تری بر این نسبت می‌گذارد. همچنین شکل ۱۹) گویای آن است هر چند با افزایش مقدار شن و میزان سربار، نسبت مقاومت برشی مخلوط به مقاومت برشی ماسه در تراکم نسبی ثابت افزایش می‌یابد اما با افزایش میزان سربار، اثر فزاینده شن بر این نسبت کاهش خواهد یافت. علت این امر ازدیاد خردشدگی دانه‌های درشت‌تر شنی در سربارهای بالاتر است.

شکل۲۰ نیز تغییرات زاویه اتساع مخلوط را با مقدار شن و تراکم نسبی برای سربارهای متفاوت نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار شن و تراکم نسبی، زاویه اتساع مخلوط افزایش خواهد یافت.

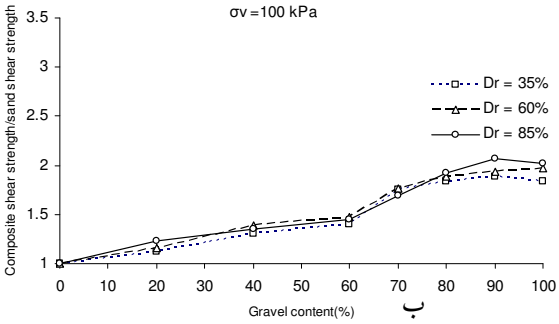


شکل۱۸. تأثیر تراکم نسبی بر نسبت مقاومت برشی مخلوط به مقاومت برشی ماسه در سربارهای الف) ۱۰۰ کیلوپاسکال

الف

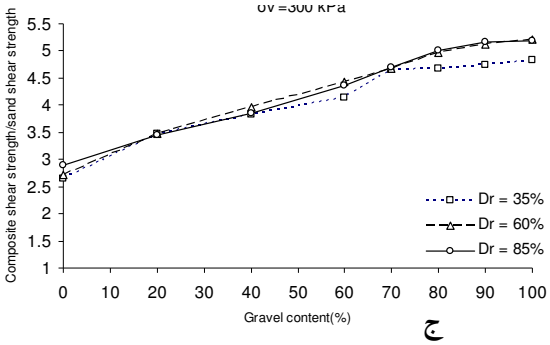
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.6.9]



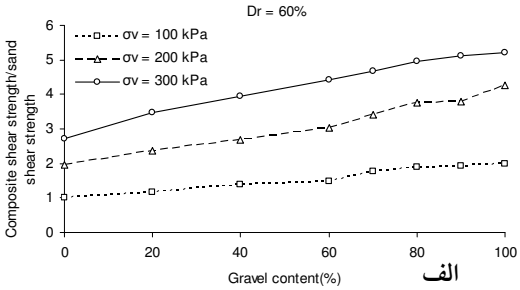
ب

شکل۱۸. ب) ۲۰۰ کیلوپاسکال



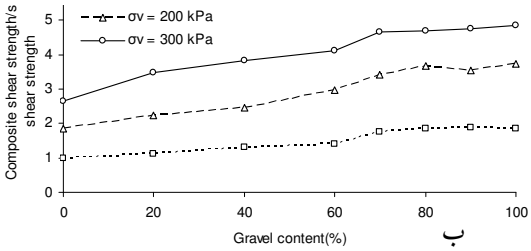
ج

ج) ۳۰۰ کیلوپاسکال



الف

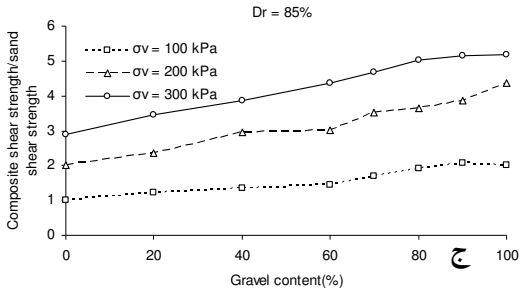
شکل۱۹. تأثیر مقدار شن بر نسبت مقاومت برشی مخلوط به مقاومت برشی ماسه در تراکم‌های
الف) ۳۵ درصد



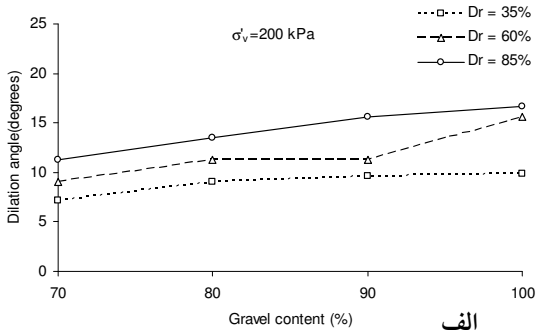
ب

ب)۶۰ درصد

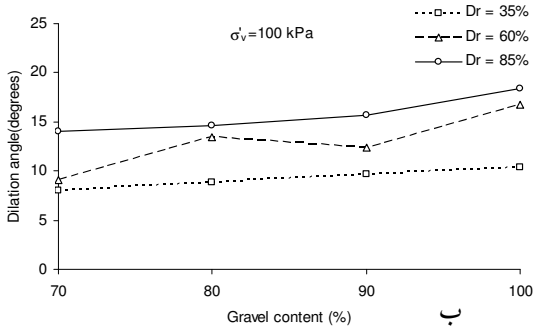
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.6.9]



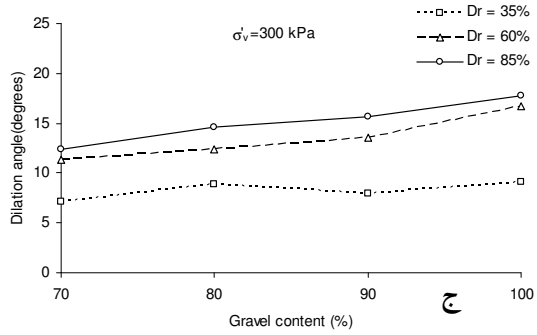
شکل۱۹. ج) ۸۵ درصد



شکل ۲۰. تغییرات زاویه اتساع در مقابل مقدار شن در تراکم‌های نسبی مختلف برای سربارهای
الف) ۱۰۰ کیلوپاسکال



ب)۲۰۰ کیلوپاسکال



ج) ۳۰۰ کیلوپاسکال

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.6.9]

نتایج

با توجه به پژوهش‌های و همچنین مقایسهٔ نتایج آزمایش‌های انجام شده برای بررسی تأثیر درصد شن، تراکم نسبی و سربار بر مقاومت برشی مخلوط‌های شن و ماسه، نتایج زیر قابل دستیابی است:

۱- با استفاده از آزمایش‌های تعیین نسبت تخلخل حداقل و حداکثر مخلوط شن و ماسه توسط حمیدی و همکاران (a-۲۰۰۹) و تکمیل این آزمایش‌ها در محدودهٔ غیرشناوری شن‌دانه‌ها در تحقیق حاضر، می‌توان درصد شن حدود ۶۰ را برای مصالح حاضر به‌عنوان آستانه شناوری شن دانه‌ها تعریف کرد.

۲- با افزایش درصد شن در مخلوط، مقاومت برشی مخلوط شن و ماسه در بازه صفر تا ۱۰۰ درصد شن، افزایش می‌یابد. این موضوع به‌دلیل افزایش اتساع خاک با ازدیاد درصد شن در آن است. با افزایش اتساع نمونه‌ها با ازدیاد درصد شن در مخلوط، کار لازم برای جابه‌جایی دانه‌ها در راستای قائم بیش‌تر می‌شود و این موضوع به نوبه خود موجب ازدیاد مقاومت برشی خاک مخلوط خواهد شد.

۳- با افزایش تراکم نسبی مخلوط در حالت‌های شناوری و غیرشناوری، مقاومت برشی مخلوط افزایش می‌یابد. در تراکم‌های نسبی بالاتر، حالت متراکم‌تری برای مخلوط ایجاد شده و تماس بین دانه‌ها و قفل و بست بین آن‌ها قوی‌تر می‌شود. در نتیجه بر مقاومت برشی مخلوط افزوده می‌شود.

۴- با افزایش سربار روی نمونه، تأثیر فزاینده سربار بر مقاومت برشی مخلوط در حالت غیرشناوری شن‌دانه‌ها کم‌تر می‌شود که علت آن را می‌توان عمدتاً به خردشدگی درشت دانه‌های شنی در سربارهای بالاتر از حدود ۱۰۰ کیلو پاسکال نسبت داد.

۵- افزایش درصد شن یا ازدیاد میزان تراکم همانند تأثیر فزاینده بر مقاومت برشی مخلوط، سبب افزایش زاویهٔ اصطکاک و زاویه اتساع آن نیز می‌شود.

۶- نرخ تغییرات مقاومت برشی با درصد شن‌دانه موجود در مخلوط، در درصدهای شن‌دانه پایین‌تر از آستانه شناوری، بیش‌تر از مقدار نظیر در درصدهای بالاتر از حد شناوری است. علت این موضوع آن است که در درصدهای بالاتر از آستانه شناوری، رفتار مخلوط کاملاً به‌وسیلهٔ فاز درشت‌تر شنی کنترل می‌شود. بدین ترتیب تغییر در درصد

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.6.9]

ماسه موجود در مخلوط تأثیر چندانی بر مقاومت برشی نخواهد گذاشت. در صورتی‌که در درصدهای پایین‌تر از حد شناوری که رفتار توسط بخش ماسه‌ای کنترل می‌شود تغییر در درصد شن موجود در مخلوط تأثیر به‌سزایی بر رفتار و مقاومت برشی خاک خواهد داشت.

تشکر و قدردانی

آزمایش‌های این تحقیق با حمایت مالی معاونت پژوهشی در آزمایشگاه مهندسی ژئوتکنیک دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت معلم تهران انجام شده است. نویسندگان مقاله مراتب سپاس خود را از این پشتیبانی اعلام می‌کنند.

منابع

1. ASTM, Annual book of ASTM standards: soils and rock division, West Conshohocken, Philadelphia (1998).
2. Evans, M.D. and Zhou, S., "Liquefaction behavior of sand-gravel composites" J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 121(3) (1995) 287-298.
3. Fragaszy, R.J., Su, W. and Siddiqi, F.H., "Effect of oversized particles on the density of clean granular soils", Geotech. Test. J., 13(2) (1990)106-114.
4. Fragaszy, R.J., Su, W., Siddiqi, F.H. and Ho, C.L., "Modeling strength of sandy gravel", J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 118(6) (1992) 920-935.
5. Hamidi, A., Yazdanjou, V., and Salimi, N., "Shear strength characteristics of sand-gravel mixtures", Int. J. Geotech. Engrg., 3(1) (2009-a) 29-38.
6. Hamidi, A., Alizadeh, M., Soleimani, S.M., "Effect of Particle Crushing on Shear Strength and Dilation Characteristics of Sand-Gravel Mixtures", Int. J. Civil Engrg., 7(1) (2009-b) 61-71.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.6.9]

7. Kokusho, T., Hara, T. and Hiraoka, R., "Undrained shear strength of granular soils with different particle gradations", J. Geotech. Geoenv. Engrg., ASCE, 130(6) (2004) 621-629.
8. Simoni, A. and Houlsby, G.T., "The direct shear strength and dilatancy of sand-gravel mixtures", Geotech. Geol. Engrg. J., 24(3) (2006) 523-549.
9. Vallejo, L.E.,"Interpretation of the limits in shear strength in binary granular mixtures", Can. Geotech. J., 38(5) (2001) 1097-1104.
10. Yagiz, S., "Brief note on the influence of shape and percentage of gravel on the shear strength of sand and gravel mixture", Bul. Engrg. Geol. Env., 60(4) (2001) 321-323.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.6.9]